

К. А. Золотухин, Т. Ф. Богатова

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

tes.urfu@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВПРЫСКА ПАРА В ГАЗОВУЮ ТУРБИНУ

В работе рассмотрены основные факторы, влияющие на изменение параметров работы газотурбинной установки и комбинированного цикла при применении впрыска пара. Приведены основные тепловые потоки, определяющие энергетический баланс камеры сгорания газовой турбины.

Ключевые слова: газовая турбина, камера сгорания, впрыск пара, КПД, мощность, энергетический баланс.

K. A. Zolotuhin, T. F. Bogatova

Ural Federal University, Ekaterinburg

APPLICATION OF GAS TURBINE STEAM INJECTION TECHNOLOGY

The major factors influencing change of the operation parameters of gas-turbine unit and combine cycle at application of steam injection are considered in the work. The main heat fluxes defining power balance of the combustion chamber of the gas turbine are given.

Keywords: gas turbine, combustion chamber, steam injection, efficiency, power, energy balance.

Применение впрыска пара в газовую турбину начиналось с установок малой мощности, в настоящее время впрыск пара применяется в турбинах средней и большой мощности. Использование впрыска пара существенно влияет на показатели работы турбины: КПД повышается на величину до 10 %, мощность увеличивается на 50–70 % [1]. Впрыск пара позволяет также

контролировать выбросы NO_x . Улучшение показателей эффективности работы газотурбинных установок, работающих по циклу с впрыском пара в камеру сгорания, обусловлено влиянием следующих основных факторов:

1) увеличение расхода рабочей среды через газовую турбину приводит к увеличению ее мощности в соответствии с формулой

$$N_{\text{ГТ}} = G_{\text{Г}} \cdot (1 + d) \cdot L_{\text{с ГТ}} \cdot \eta_{\text{ГТ}} \quad (1)$$

где $G_{\text{Г}}$ – расход продуктов сгорания через газовую турбину; d – относительный расход впрыскиваемого пара $D_{\text{п}}$ в газопаровой смеси, $d = D_{\text{п}}/G_{\text{Г}}$; $L_{\text{с ГТ}}$ – изоэнтروпийный (без учета теплообмена с внешней средой и потерь на трение) теплоперепад в газовой турбине; $\eta_{\text{ГТ}}$ – КПД газовой турбины.

Увеличение мощности ГТ приводит к увеличению полезной мощности всей ГТУ.

2) улучшение энергетических свойств рабочего вещества газовой турбины значение газовой постоянной газопаровой смеси $R_{\text{см}}$ больше, чем значение газовой постоянной газа $R_{\text{Г}}$. При прочих равных условиях давление газопаровой смеси $p_{\text{см}}$ в камере сгорания будет выше по сравнению со значением давления газов $p_{\text{Г}}$. В результате в турбине срабатывается больший теплоперепад, и, соответственно, увеличиваются эффективная мощность и КПД ГТУ.

Для расчета камеры сгорания, в том числе со впрыском пара, необходимо составить энергетический баланс камеры сгорания [2]:

$$Q_{\text{а3}} + Q_{\text{f4}} + Q_{\text{w4}} + Q_{\text{ct3.2}} + P_{\text{б}} + Q_{\text{ex}} = Q_{\text{ct3.1}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{г6}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{а3}} = (m_{\text{а3}} - m_{\text{е3}}) \cdot h_{\text{а3}}$ – тепловой поток, выходящий с воздухом из компрессора;

m – массовые расходы, кг/с; h – удельные энтальпии, кДж/кг;

$Q_{\text{f4}} = m_{\text{f4}} \cdot (Q_i^r + h_{\text{f4}} - h_0)$ – тепловой поток, вносимый топливом;

$Q_{\text{w4}} = m_{\text{w4}} \cdot h_{\text{w4}}$ – тепловой поток, вносимый водой/паром;

$Q_{\text{ct3.2}} = m_{\text{ct3}} \cdot h_{\text{ct3.2}}$ – тепловой поток, вносимый охлаждающим воздухом из охладителя;

$P_{\text{б}}$ – потребляемая дожимным воздушным компрессором охлаждающего воздуха мощность;

Q_{ex} – эквивалент отбора охлаждающего воздуха;

$Q_{\text{ct3.1}} = m_{\text{ct3}} \cdot h_{\text{а3}}$ – тепловой поток с охлаждающим воздухом, подаваемым в воздухоохладитель;

$Q_r = (1 - \eta_{tc}) \cdot m_{f4} \cdot (Q_i^r + h_{f4} - h_0)$ – радиационные и конвективные тепловые потери;

$Q_{g6} = m_{g6} \cdot h_{g6}$ – тепловой поток с газами на входе в турбину.

Принципиальная схема ГТУ с тепловыми потоками приведена на рис. 1.

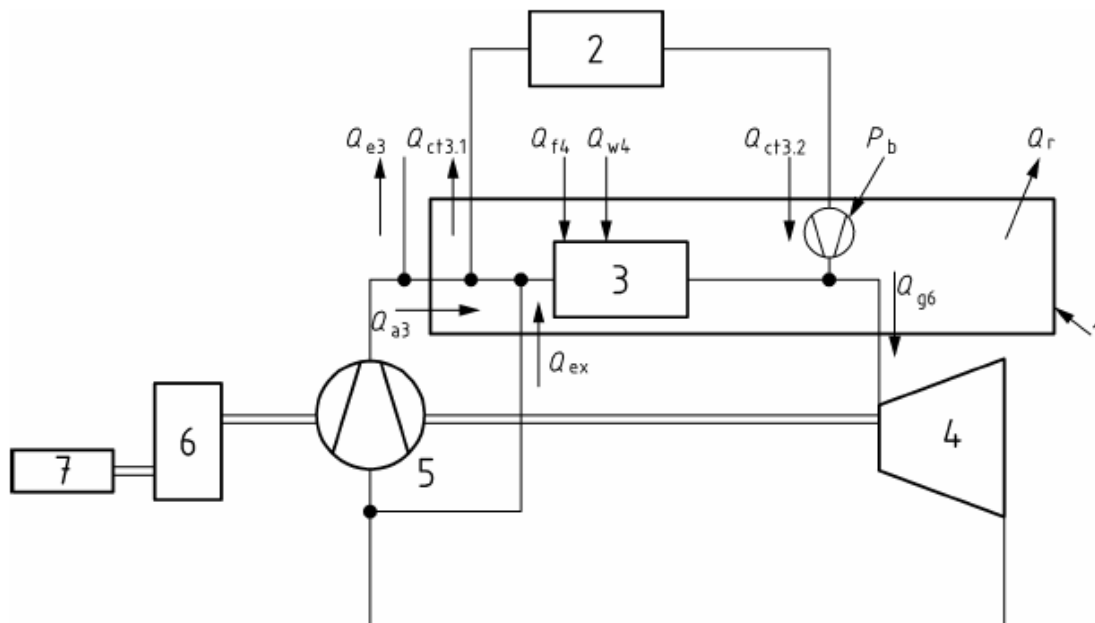


Рис. 1. Контролируемая зона для энергетического баланса камеры сгорания [2]

1 – контролируемая зона; 2 – воздухоохладитель; 3 – камера сгорания (источник тепла); 4 – турбина; 5 – компрессор; 6 – редуктор; 7 – нагрузка

При проведении расчетов предполагается, что радиационные и конвективные потери тепла для камеры сгорания равны радиационным и конвективным потерям тепла для всей газотурбинной системы.

Многие газовые турбины используют охлаждающий воздух, который извлекается не только из выпуска компрессора, но и из различных ступеней отбора компрессора. Для упрощения расчетов вводится эквивалент Q_{ex} отбора охлаждающего воздуха из компрессора.

$$Q_{ex} = (m_{a1} - m_{eq}) \cdot h_{a1} \quad (2)$$

где m_{a1} – массовый расход на входе в компрессор, кг/с;

m_{eq} – массовый расход воздуха на входе эквивалентного компрессора без отбора охлаждающего воздуха, но с той же потребляемой мощностью как у фактического компрессора, кг/с;

h_{a1} – удельная энтальпия воздуха, поступающего в компрессор при температуре T_{a1} , кДж/кг.

Влияние впрыска пара на производительность комбинированного цикла показано на рис. 2.

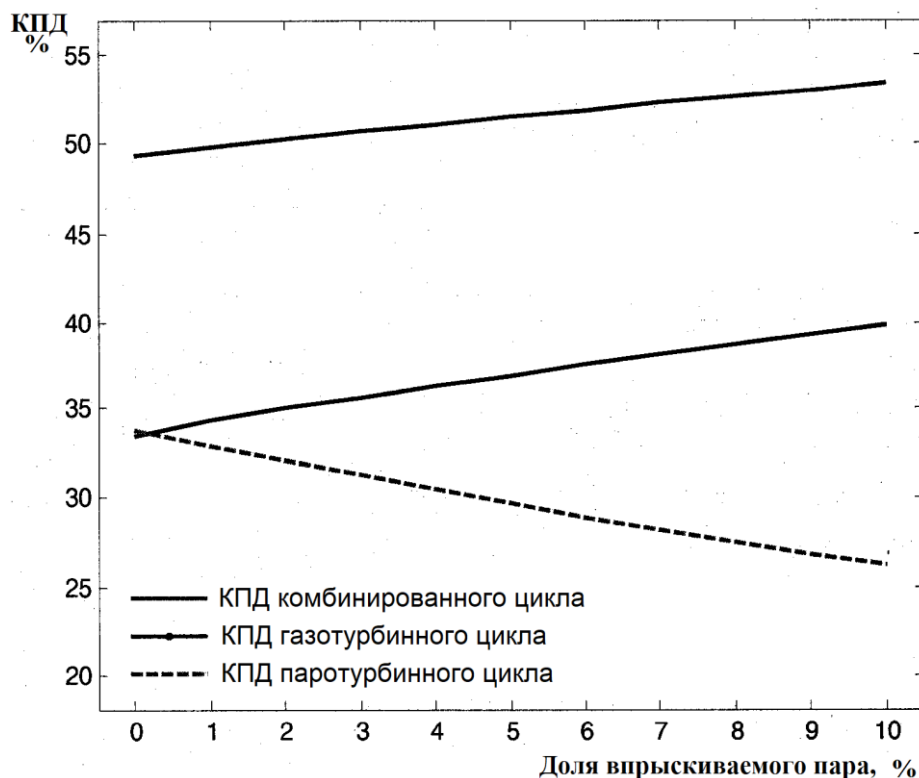


Рис. 2. Влияние доли впрыскиваемого пара на эффективность верхнего, нижнего и комбинированных циклов ($T_0^{\Gamma T} = 1500 \text{ К}$, $\pi_k = 22$)

Как видно из графика, увеличение доли впрыска пара привело к снижению эффективности нижнего паротурбинного цикла. Это объясняется тем, что увеличение количества пара для впрыска, отбираемого из нижнего цикла, приводит к снижению его производительности за счет уменьшения расхода пара через паровую турбину. Однако увеличение впрыска пара приводит к более высокой производительности и эффективности верхнего цикла и общей эффективности комбинированного цикла. Это повышение эффективности можно объяснить увеличением массового расхода продуктов сгорания в верхнем цикле, а также изменением удельной теплоты газа.

Список использованных источников

1. Poullikkas A. Review an overview of current and future sustainable gas turbine technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2005. V. 9, Is. 5. P. 409–443.
2. International Standard ISO 2314 : 2009 (E). Gas turbines – Acceptance tests, 2009. 114 p.